

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАСОСНЫХ ШТАНГ

IMPROVING OF MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF SUCKER RODS

Н.А.Богатов

И.В. Лещев, Ю.В. Худорожкова, А.А. Богатов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, ivanleshechchev@mail.ru, khjv@mail.ru, omd@mtf.ustu.ru

Abstract

This paper is devoted to analyzes of the microstructure and properties of recovered trial sucker rods after working life, in order to determine the suitability of the proposed treatment regimes. Statistical data processing was used in the analysis of the mechanical properties. It is determined that during the process of recovery rolling of sucker rods with accelerated cooling yield strength of rods compared with yield strength produced by Ocher Machine Building Plant increased up to 1.4 times, elongation – up to 2 times, impact elasticity – ut to almost 3 times.

Введение

Продление срока службы насосных штанг является одной из актуальных задач в нефтяном производстве. Отработавшие определенный период времени насосные штанги можно подвергать реновации (штанги контролируются на наличие дефектов, отбираются наименее дефектные и обрабатываются по различным режимам).

Тенденция ужесточения требований к качеству и эксплуатационным характеристикам металлопродукции является в настоящее время актуальной. Важность повышения прочности и вязкости разрушения стали состоит:

- в повышении эксплуатационной надежности и долговечности металлопродукции;
- в уменьшении массы машин и сооружений;
- в уменьшении энергозатрат и применении привода машин меньшей мощности.

Прекращение или отсутствие фонтанирования обусловило использование других способов подъема нефти на поверхность, например, посредством штанговых скважинных насосов. Штанговые глубинные насосы (ШГН) - наиболее распространенный способ механизированной добычи нефти (~60% добычи в Северной Америке и ~70% во всем мире). Самая частая проблема, с которой приходится иметь дело при эксплуатации этих насосов, - это их низкая производительность в результате неполного заполнения насоса жидкостью. Это происходит, если производительность и эффективность насоса превышает дебит скважины или из-за плохой сепарации газа на приеме. Производительность насоса снижается из-за попадания в него газа.

Если скважины будут обслуживаться насосом, заполненным жидкостью, то это обеспечит их более эффективную работу и снижение производственных расходов. Для того чтобы работать с полностью заполненным жидкостью насосом, необходимо устранить попадание газа и контролировать продолжительность работы насоса, с тем чтобы объемная производительность насоса соответствовала притоку пластового флюида.

Необходимо периодически контролировать работу системы, чтобы не возникали механические неисправности в насосе и поддерживалась эффективная эксплуатация скважин [4, 5].

Этими насосами в настоящее время оборудовано большинство скважин. Дебит скважин — от десятков килограмм в сутки до нескольких тонн. Насосы опускают на глубину от нескольких десятков метров до 3000 м, иногда до 3200 — 3400 м. В Поволжье, Башкирии, Татарстане, Пермском крае, Удмуртии в эксплуатации находятся более 65 тыс. скважин, из них 40 тыс. — со штанговыми глубинными насосами. Ежегодно 300 тыс. штанг изнашивается и утилизируется в металлолом. Основной причиной износа является разрушение штанг. Для удовлетворения задач потребителя требуется повышение долговечности насосных штанг в 2-3 раза по сравнению с существующими штангами, циклическая стойкость которых достигает 5 миллионов циклов.

На рис. 1 показаны штанговые глубинные насосы. Установка штангового глубинного насоса включает:

- а) наземное оборудование — станок-качалка (СК), оборудование устья, блок управления;
- б) подземное оборудование — насосно-компрессорные трубы (НКТ), штанги насосных (ШН), штанговый скважинный насос (ШСН) и различные защитные устройства, улучшающие работу установки в осложненных условиях.

В Поволжье, Башкирии, Татарстане, Пермском крае, Удмуртии в эксплуатации находятся более 65 тыс. скважин, из них 40 тыс. — со штанговыми глубинными насосами. Ежегодно 300 тыс. штанг выходят из строя и утилизируется в металлолом. Для удовлетворения задач потребителя требуется повышение долговечности насосных штанг в 2-3 раза по сравнению с существующими штангами, циклическая стойкость которых достигает 5 миллионов циклов.

Штанги, не подлежащие ремонту, списывают в металлолом. Ежегодно в ОАО «Татнефть» имеет место 250 случаев обрывов штанг, в «Лукойл» - 400 случаев. Ликвидация обрыва штанг связана с большими затратами и потерями. Продление срока службы насосных штанг является одной из актуальных задач при

сдвиговой прокатки (РСП). После реновации обычно получаются штанги меньшего диаметра, которые также нужны в производстве.



Настоящее исследование посвящено анализу структуры и свойств восстановленных (реновированных) опытных насосных штанг после выработки, с целью определения возможности применения предложенных режимов обработки.

Для исследования были выбраны образцы, полученные в продольном и поперечном сечении из различных участков насосных штанг. Материалом из которого изготовлены насосные штанги является сталь типа 20Н2М. Химический состав приведен в таблице 1.

Химический состав исследуемых образцов (по данным ОАО «Очерский машзавод»)

Марка стали	Содержание элементов, % (масс)					
	C	Si	Mn	Ni	Mo	P
20H2M	0,19÷0,26	0,25÷0,33	0,55÷0,65	1,60÷1,80	0,19÷0,23	0,013÷0,019

Для настоящего исследования были взяты образцы выточенные из различных мест опытных насосных штанг:

- образцы насосных штанг концевого участка с муфтой (комплект 1);
- образцы насосных штанг средней части (комплект 2);
- образцы насосных штанг концевого участка с ниппельной стороны (комплект 3).

Штанги были изготовлены по стандартной технологии, основанной на использовании круглого проката, разрезки на мерные длины, прессовой

204

Оптическая микроскопия является традиционным методом металлографических структурных исследований.

Исследование структуры и механических свойств проводили на базе ОАО «Северский трубный завод». Микроструктурные исследования выполняли на световом микроскопе Leica. ДюрOMETрические испытания проводили на твердомере по Бринеллю, характеристики прочности и пластичности материала определяли используя стандартные пятикратные образцы диаметром 10 мм. Ударную вязкость KCU определяли при температуре 25 °С на маятниковом копре на образцах сечением 10x10 мм с U-образным надрезом.

Задачи исследования:

- исследовать механические свойства на высаженных концах и средней части штанги и оценить неоднородность свойств;
- при исследовании твердости выявить зону термического влияния на свойства по длине штанги.

Исследования структуры и изломов методом растровой электронной микроскопии выполняли на базе Центра коллективного пользования «Лаборатория электронной микроскопии» Новосибирского государственного технического университета на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP при ускоряющих напряжениях 0,2 – 30 кВ, максимальное разрешение: 3 нм, с системой рентгеновского волнодисперсионного микроанализа EDS X-Act (Oxford Instruments), Si-drift детектором 10 мм² и разрешением по Mn K_α = 133 эВ.

Для статистического анализа полученных при механических испытаниях образцов насосных штанг данных использовался алгоритм обработки опытных данных [1, 2, 3].

2. Экспериментальные результаты

2.1. Алгоритм статистической обработки опытных данных

Расчет выборочных средних арифметических и дисперсий

Для статистического анализа полученных при испытаниях штанг данных воспользуемся формулами математической статистики.

Выборочное среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i;$$

Выборочная

дисперсия

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right];$$

Среднеквадратическое

(стандартное)

отклонение $S = +\sqrt{s^2}$.

Сравнение дисперсий двух совокупностей

Проверим нулевую гипотезу о том, что полученные выборки принадлежат генеральным совокупностям с равными дисперсиями.

1) $H_0: S_A^2 = S_B^2$,

где S_A^2 - генеральная дисперсия механического свойства образцов штанг из комплекта А; S_B^2 - генеральная дисперсия механического свойства образцов штанг из комплекта В.

В качестве альтернативной гипотезы следует использовать гипотезу о том, что дисперсия механического свойства образцов штанг из комплекта А больше дисперсия механического свойства образцов штанг из комплекта В:

2) $H_1: S_A^2 > S_B^2$.

3) Для проверки нулевой гипотезы при выбранной альтернативной следует использовать односторонний критерий Фишера.

4) Значение статистики $F = \frac{S_A^2}{S_B^2}$.

5) Границу критической области определим из таблиц квантилей распределения Фишера ($F_{\nu_A, \nu_B, \alpha}$) для уровня значимости $\alpha=0.05$ и числа степеней свободы $\nu_A=N_A-1$ и $\nu_B=N_B-1$.

6) Затем сравним значение статистики F со значением из таблицы квантилей распределения Фишера. Если $F \leq F_{\nu_A, \nu_B, \alpha}$ выполняется, то подтверждается нулевая гипотеза, если нет, то нулевую гипотезу следует отвергнуть и принять альтернативную.

Сравнение средних арифметических двух совокупностей

Известны оценки средних арифметических

\bar{X}_A и \bar{X}_B .

Нулевая гипотеза в данном случае может быть сформулирована как утверждение о равенстве средних арифметических механических свойств образцов насосных штанг из разных комплектов.

1) $H_0: \bar{X}_A = \bar{X}_B$.

Учитывая тот факт, что $\bar{X}_A > \bar{X}_B$, в качестве альтернативной следует выбрать гипотезу о том, что среднее арифметическое механического свойства образцов комплекта А больше среднее арифметическое механического свойства образцов комплекта В:

2) $H_1: \bar{X}_A > \bar{X}_B$.

3) Для проверки нулевой гипотезы, при выбранной альтернативной, следует использовать односторонний критерий Стьюдента.

4) В качестве статистики следует использовать следующую:

$$t = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{\frac{S_A^2}{N_A} + \frac{S_B^2}{N_B}}}$$

5) Для определения границ критической области этого критерия определим число степеней свободы из выражения

$$\frac{1}{\nu} = \frac{c^2}{N_A - 1} + \frac{1 - c^2}{N_B - 1},$$

$$\text{где } c^2 = \frac{\frac{s_A^2}{N_A}}{\frac{s_A^2}{N_A} + \frac{s_B^2}{N_B}}.$$

Находим табличное значение квантили распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha=0.05$ и рассчитанного числа степеней свободы.

6) Если неравенство $|t| \leq t_{\alpha, \nu}$ выполняется, то принимаем нулевую гипотезу, если нет – то нулевую гипотезу следует отвергнуть и принять альтернативную.

2.2. Механические свойства материала опытных штанг

Для определения механических свойств материала образцов насосных штанг от каждого комплекта было изготовлено по три образца (исключение: испытания на растяжение-разрыв для комплекта №1 – 2 образца, а также для испытания на твердость – по 2 образца от каждого комплекта). Распределение механических свойств стали 20Н2М насосных штанг приведено в табл.2.

Таблица 2

Распределение механических свойств стали 20Н2М

№ комплекта	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	КСУ ⁺²⁴ МДж/м ²	Твердость по Бринеллю НВ, ед.
1	763	710	20,1	2,21	239-243-241 239-239-238
	764	687	19,7	2,33	
				2,15	
2	767	699	19,7	2,18	233-233-235 242-245-241
	766	715	18,9	2,25	
	766	696	19,7	2,19	
3	751	664	21,5	2,11	239-234-237 235-233-235
	754	689	19,7	2,40	
	748	658	20,9	2,25	

Проведем статистический анализ полученных данных по механическим испытаниям. Точечные оценки временного сопротивления, условного предела текучести, относительного

удлинения, ударной вязкости и твердости по Бринеллю для каждого комплекта образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Точечные оценки полученных результатов по механическим свойствам

Точечные оценки	№ комплекта	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	КСУ ⁺²⁴ МДж/м ²	Твердость по Бринеллю НВ, ед.
Выборочное среднее арифметическое, \bar{x}	1	763,5	698,5	19,9	2,23	239,85
	2	766,67	703,33	19,37	2,207	238,17
	3	751	670,3	20,7	2,253	235,5
Выборочная дисперсия, s^2	1	0,5	264,5	0,08	0,0084	3,367
	2	0,33	104,33	0,213	0,00143	26,567
	3	9	270,33	0,84	0,021	4,7
Среднеквадратическое отклонение, s	1	0,707	16,26	0,283	0,0917	1,835
	2	0,574	10,21	0,462	0,0378	5,154
	3	3	16,44	0,917	0,145	2,168

Статистическое сравнение дисперсий и средних арифметических механических свойств образцов штанг комплекта 1 и 2 проведем по алгоритму, изложенному в параграфе 3.1 (табл.4 и 5).

Как видно из табл.4 неравенство $F \leq F_{\nu_A, \nu_B, \alpha}$ для каждого мехсвойства выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве дисперсий механических свойств образцов штанг комплекта 1 и 2.

Таблица 4

Таблица сравнения дисперсий мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю, ед.		
	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$
1	0,5	1,51	18,5	264,5	2,54	18,5	0,08	0,38	18,5	0,0084	5,87	19,0	3,367	0,127	5,05
2	0,33			104,33			0,213			0,00143			26,567		

Таблица 5

Таблица сравнения средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю, ед.		
	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$
1	763,5	5,283	12,706	698,5	0,374	12,706	19,9	1,591	12,706	2,23	0,402	4,303	239,85	0,752	2,571
2	766,67			703,33			19,37			2,207			238,17		

Как видно из табл.5 неравенство $|t| \leq t_{\alpha, v}$ для каждого мехсвойства выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2. Таким образом, в силу статистического равенства дисперсий и средних арифметических совокупностей значений мехсвойств образцов

штанг комплекта 1 и 2, эти совокупности можно объединить в одну.

Аналогичное статистическое сравнение дисперсий и средних арифметических механических свойств образцов штанг комплекта 2 и 3 проведем по алгоритму, изложенному в параграфе 3.1 (табл.6 и 7).

Таблица 6

Таблица сравнения дисперсий мехсвойств образцов штанг комплекта 2 и 3

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю, ед.		
	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$
2	0,33	0,037	19,0	104,33	0,386	19,0	0,213	0,254	19,0	0,00143	0,068	19,0	26,567	5,65	5,05
3	9			270,33			0,84			0,021			4,7		

Как видно из табл.6 неравенство $F \leq F_{v_A, v_B, \alpha}$ для каждого мехсвойства, кроме твердости по Бринелю, выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве дисперсий механических свойств образцов штанг комплекта 2 и 3. Для твердости это неравенство не

выполняется, следовательно применяем альтернативную гипотезу о том, что выборочная дисперсия твердости по Бринелю для образцов штанг комплекта 2 больше выборочной дисперсии твердости образцов штанг комплекта 3.

Таблица 7

Таблица сравнения средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринелю НВ, ед.		
	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$
2	767,67	9,453	4,303	703,33	2,956	4,303	19,37	2,245	4,303	2,207	0,532	4,303	238,17	1,170	2,571
3	751			670,3			20,7			2,253			235,5		

Как видно из табл.7 неравенство $|t| \leq t_{\alpha, v}$ для предела текучести, ударной вязкости, относительного удлинения и твердости выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 2 и 3. Однако, для временного сопротивления это неравенство не выполняется, следовательно принимается альтернативная гипотеза о том, что среднее арифметическое временного сопротивления образцов штанг комплектов 2 больше чем среднее арифметическое временного сопротивления образцов штанг комплекта 3. Это означает, что статистически значимыми показателями (с вероятностью 95%) являются средние арифметические временного сопротивления образцов штанг комплекта 2 по сравнению с аналогичными показателями свойств образцов штанг комплекта 3.

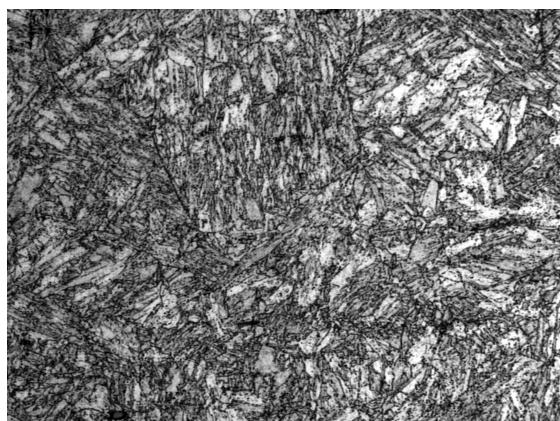
Итак, проведенный статистический анализ механических свойств показал:

- значения предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости образцов насосных штанг по всей длине штанги являются статистически равными;

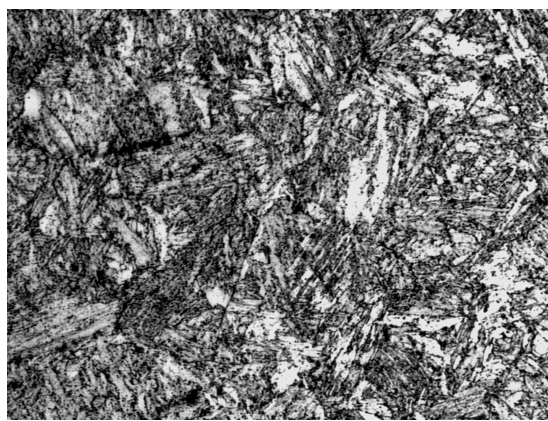
- значения временного сопротивления и твердости образцов насосных штанг, взятых из средней части и конца с муфтой, также являются статистически равными;
- значения временного сопротивления и твердости образцов насосных штанг, взятых от нипельного конца отличаются от соответствующих свойств образцов из средней части, однако проведенный анализ (в частности точечные оценки) позволяет утверждать, что стандартное отклонения временного сопротивления и твердости от средних значений не превышает 4%.

2.3. Структурные изменения в прутках.

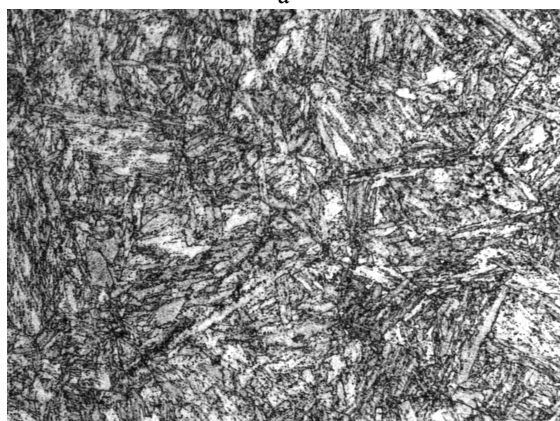
Для анализа микроструктуры были изготовлены продольные и поперечные шлифы от каждого комплекта штанг. На рис.2 представлена структура стали 20Н2М в исследуемых образцах насосных штанг.



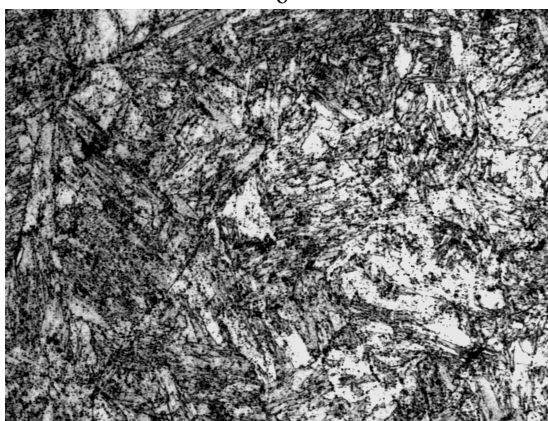
а



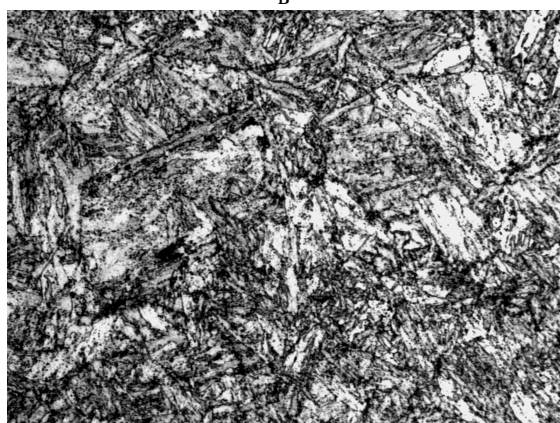
б



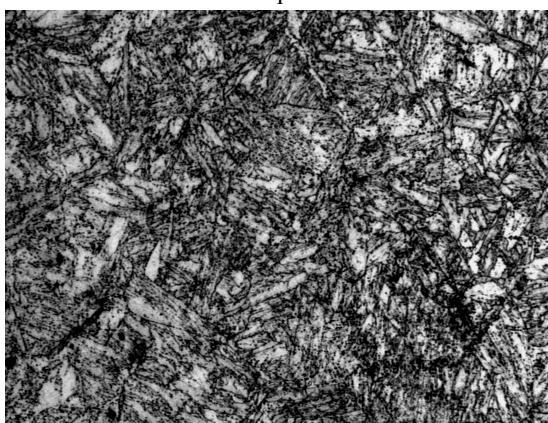
в



г



д



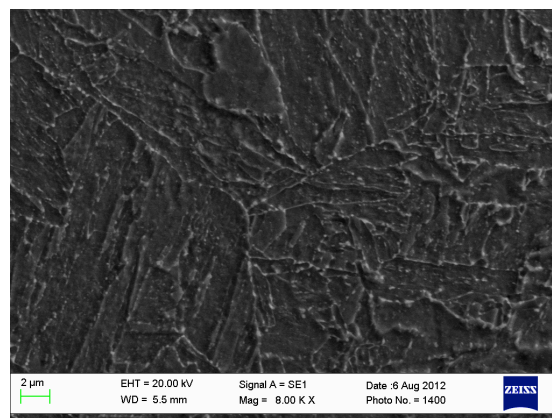
з

а – в продольном сечении верхней части штанги, б - в поперечном сечении верхней части штанги, в - в продольном сечении средней части штанги, г - в поперечном сечении средней части штанги, д - в продольном сечении нижней части штанги, з - в поперечном сечении средней нижней части штанги.

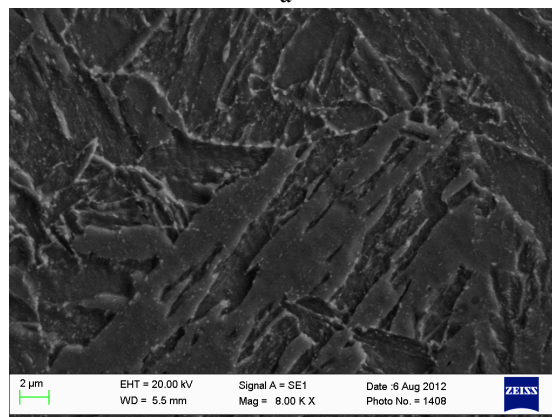
Рисунок 2 – Структура образцов стали 20H2M, увеличение x1000

Из представленных рисунков видно, что структура представлена трооститом отпуска. Металлографические исследования при большем увеличении рис. 3 показывают, что троостит

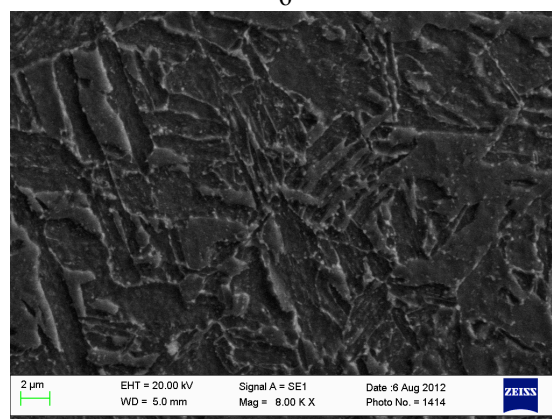
отпуска представляет собой феррито-карбидную смесь с относительно равномерным распределением карбидов.



а



б



в

а – в продольном сечении концевой участка с муфтой; б – в продольном сечении средней части штанги; в – в продольном сечении концевой участка с нипельной стороны.

Рисунок 3 – Структура образцов стали 20Н2М

Однако на рис. 4 видно, что карбидная фаза декорирует границы бывших мартенситных пластин.

Данные условия отпуска еще не приводят к активной коагуляции карбидной фазы. Для проведения детального сравнения необходимо выполнить структурные исследования не только с образцов полученных от отработавших повторно штанг, но и после предложенной обработки, а также после первоначального изготовления и первого цикла выработки.

На рис. 5 приведены изломы образцов, полученных в продольном сечении из различных участков штанг.



Рисунок 4 – Микроструктура исследуемой стали

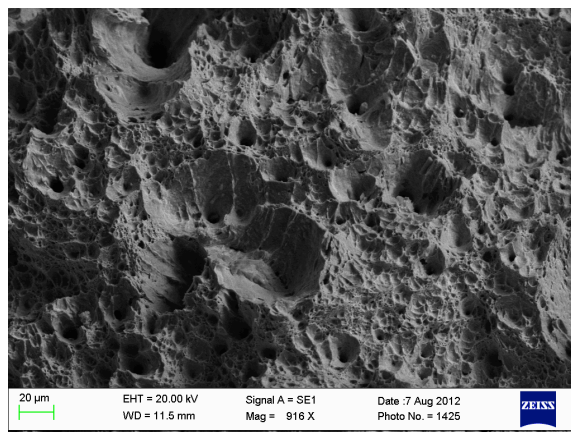
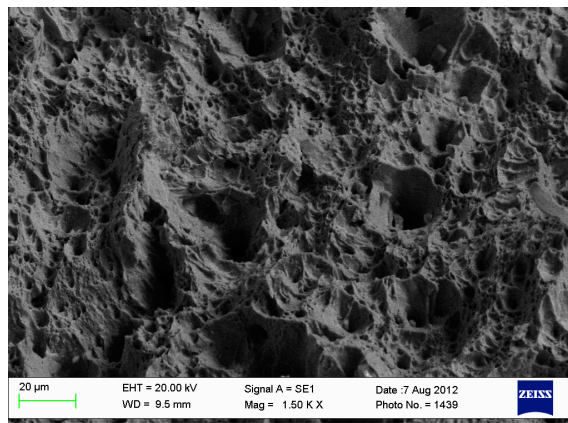
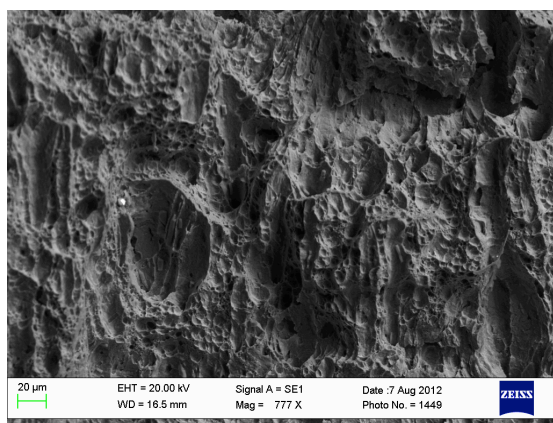


Рисунок 5 – Изломы исследуемой стали

Как видно из рисунка излом вязкий имеет ямочный микрорельеф. На поверхности излома наблюдаются характерные длинные выступы и впадины, расположенные рядами, что говорит о волокнисто-полосчатом изломе. Иногда встречаются трещины по границам зерен. По всей поверхности излома во всех образцах не обнаруживается какой-либо ясно выраженной пористости, которая могла бы свидетельствовать о накоплении пор и рыхлот при эксплуатации и восстановительной обработке (прокатке) в исследованных штангах.

2.4. Анализ повреждаемости металла по изломам образцов.

При исследовании структуры шлифов и изломов растянутых при 20°C образцов №1-4 в бинокулярном микроскопе обнаруживаются отдельные небольшие по размерам каверны, надрывы, расслоения и несплошности. В Очерских растянутых образцах № 5-6 также видны подобные дефекты. Эти дефекты мало влияют на характеристики пластичности ψ и δ . Чтобы точнее оценить дефектность прокатанной стали были проведены исследования (в сканирующем электронном микроскопе) структуры поверхности изломов, полученных на образцах с трещиной в процессе динамического разрушения при -196°C. В этих условиях заведомо хрупкого разрушения реально существующие рыхлоты и каверны не должны вуалироваться зонами пластической деформации. Как видно из рис.6-10, разрушение образцов №№ 1,2,3,5,6 при 77K хрупкое.

Преобладают транскристаллитные сколы. Иногда встречаются трещины и по границам зерен. В отдельных случаях встречаются очень редкие локальные участки вязкого ямочного излома (см. рис. 5). По всей поверхности хрупкого излома во всех образцах не обнаруживается какой-либо ясно выраженной пористости, которая могла бы свидетельствовать о накоплении пор и рыхлот при эксплуатации и восстановительной обработке (прокатке) в исследованных прутках.

Заключение

В результате структурных исследований и анализа механических свойств на образцах стали 20H2M, вырезанных из опытных прутков насосных штанг, установлено, что в процессе реновационной прокатки прутков по разным режимам, наблюдается частичное мартенситное превращение, приводящее к повышению твердости и прочности, особенно в приповерхностных зонах прутков. В этих условиях частичное мартенситное превращение мало отражается на характеристиках пластичности и прочности стали в средней части прутков. Однако ударная вязкость может снижаться в 2-2,5 раза. С целью повышения механических свойств прутков после предлагаемых оптимальных режимов реновационной прокатки необходимо осуществлять дополнительный высокий отпуск или закалку + отпуск «подкаленных» при прокатке прутков. Первый режим проще в производстве. Наиболее предпочтительные механические свойства, особенно значения ударной вязкости, были получены в образцах, прокатанных по

режиму (прокатка от диаметра 22 до 19 мм при 950⁰С с охлаждением валков водой) и подвергнутых дополнительной термообработке - высокому отпуску при 500⁰С (2 часа).

Установлено, что в процессе реновационной прокатки с ускоренным охлаждением насосных штанг в 1,4 раза повышается условный предел текучести по сравнению с пределом текучести штанг, производимых на Очерском машиностроительном заводе; сравнительный анализ значений предела прочности, ударной вязкости и относительного удлинения свидетельствуют о преимуществе новой технологии по сравнению с существующей на Очерском машиностроительном заводе. В изломе образцов после испытаний на ударную вязкость вязкая составляющая находится в пределах от 45 до 50%. При анализе полученных опытных значений твердости зона термического влияния не выявлена.

При сравнении средних значений опытных данных механических свойств с нормативными значениями по ТУ3665-007-002175515-98 и ГОСТ 4543-71 получили следующее:

1. среднее значение опытных данных временного сопротивления соответствует нормативному значению;
2. остальные средние значения опытно-измеренных механических свойств значительно превышают нормативные значения: условный предел текучести – на 40%, относительное удлинение – в 2 раза, ударная вязкость – почти в 3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971.
2. Михайленко А.М., Бондин А.Р. Обработка опытных данных. Статистические гипотезы и выводы. – Изд. ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003.
3. Обработка одномерных опытных данных: методические указания к выполнению домашнего задания по курсам «Экспериментальная механика» и «Организация эксперимента» / А.М. Михайленко. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 64 с.
4. S. Miska, A. Sharaki, J.M. Rajtar Journal of Petroleum Science and Engineering 17 (1997) 303-312.
5. Luan Guo-Hua, He Shun-Li, Yang Zhi, Zhao Hai-Yang, Hu Jing-Hong, Xie Quan, Shen Ying-hao Journal of Petroleum Science and Engineering 80 (2012), 75–80.